

一般セッション(口頭講演) | KS 研究会セッション: KS.1 固体量子センサ研究会

2024年9月20日(金) 13:30 ~ 15:45 会場 A41 (朱鷺メッセ4F)

[20p-A41-1~8] KS.1 固体量子センサ研究会

小野田 忍(量研機構)、安 東秀(北陸先端大)

◆ 奨励賞エントリー

13:30 ~ 13:45

[20p-A41-1]

エアギャップ付き磁性体コアおよびダイヤモンド量子センサを用いた電流計測の原理実証

○村松 秀和^{1,2}、貝沼 雄太²、波多野 雄治²、天谷 康孝¹、加藤 宙光¹、坂本 憲彦¹、山田 達司¹、浦野 千春¹、金子 晋久¹、阿部 浩之³、小野田 忍³、大島 武³、波多野 睦子²、岩崎 孝之² (1.産総研、2.東工大、3.量研)

◆ 英語発表

13:45 ~ 14:00

[20p-A41-2]

Using the standard deviation for robust quantum sensing

○Ernst David Herbschleb¹, So Chigusa^{2,3}, Riku Kawase¹, Hiroyuki Kawashima¹, Masashi Hazumi^{4,5,6,7,8}, Kazunori Nakayama^{9,4}, Norikazu Mizuochi^{1,10,4} (1.Kyoto Univ., 2.UC Berkeley, 3.LBNL, 4.QUP/KEK, 5.IPNS, 6.JAXA/ISAS, 7.Kavli IPMU/WPI, 8.SOKENDAI, 9.Tohoku Univ., 10.CSRN)

◆ 奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[20p-A41-3]

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターからの同一光子生成

○阿部 椋太郎¹、汪 鵬¹、谷口 尚²、小野田 忍³、波多野 睦子¹、岩崎 孝之¹ (1.東工大、2.NIMS、3.QST)

◆ 奨励賞エントリー

14:15 ~ 14:30

[20p-A41-4]

爆轟ナノダイヤモンド中のSnV中心の発光スペクトル測定

○(M1)大堀 真尚¹、蘇 梓傑²、藤原 正規¹、牧野 有都³、鶴井 明彦³、西川 正浩³、水落 憲和^{1,4} (1.京大化研、2.量研機構、3.(株)ダイセル、4.京大スピンセンター)

14:45 ~ 15:00

[20p-A41-5]

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターの非共鳴レーザによる電荷状態遷移

○陳 溢暘¹、阿部 椋太郎¹、谷口 尚²、小野田 忍³、波多野 睦子¹、岩崎 孝之¹ (1.東工大、2.NIMS、3.QST)

◆ 奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[20p-A41-6]

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターにおけるコヒーレントポピュレーショントラッピング

○池田 翔¹、陳 溢暘¹、汪 鵬¹、阿部 椋太郎¹、谷口 尚²、波多野 睦子¹、岩崎 孝之¹ (1.東工大、2.NIMS)

15:15 ~ 15:30

[20p-A41-7]

炭化ケイ素シリコン空孔荷電状態安定性の定量的解析

○山崎 雄一¹、明石 遼介¹、花輪 雅史²、村田 晃一²、佐藤 真一郎¹、宮脇 信正¹、圓谷 志郎¹、増山 雄太¹、西谷 侑将^{3,4}、松下 雄一郎^{1,3,4}、土田 秀一²、好田 誠^{1,5}、大島 武^{1,5} (1.量研、2.電中研、3.Quemix、4.東大、5.東北大)

◆ 奨励賞エントリー

15:30 ~ 15:45

[20p-A41-8]

室温における4H-SiC中V2中心蛍光の偏光特性

○(P)西川 哲理¹、森岡 直也^{1,2}、阿部 浩之³、大島 武^{3,4}、水落 憲和^{1,2,5} (1.京大化研、2.京大スピンセンター、3.量研、4.東北大、5.QUP KEK)

エアギャップ付き磁性体コアおよびダイヤモンド量子センサを用いた 電流計測の原理実証

Demonstrating current measurement by the diamond quantum sensor
using an air-gapped magnetic core

産総研¹, 東工大², 量研³ ○村松 秀和^{1,2}, 貝沼 雄太², 波多野雄治², 天谷 康孝¹,
加藤 宙光¹, 坂本 憲彦¹, 山田 達司¹, 浦野千春¹, 金子 晋久¹, 阿部 浩之³, 小野田 忍³,
大島 武³, 波多野 睦子², 岩崎 孝之²

AIST¹, Tokyo Tech.², QST³ ○Hidekaizu Muramatsu^{1,2}, Yuta Kainuma², Yuji Hatano²,
Yasutaka Amagai¹, Hiromitsu Kato¹, Norihiko Sakamono¹, Tatsuji Yamada¹, Chiharu Urano¹,
Nobu-Hisa Kaneko¹, Hiroshi Abe³, Shinobu Onoda³, Takeshi Ohshima³, Mutsuko Hatano²,
and Takayuki Iwasaki²

E-mail: muramatsu.h@aist.go.jp

電流比較器は、磁性体コアに巻きつけられた一次巻線と二次巻線を通る電流がコア中に生成する磁束を打ち消し、わずかにコア中に残留する磁束（残留磁束）をゼロとなるよう調整することで電流比を巻線比から決定することができる精密計測機器である。電流比を高精度に決定するためには、残留磁束を高感度に検出する必要があり、従来の電流比較器では電磁誘導現象を利用した検出巻線が用いられてきた。しかし、検出巻線では高磁場感度を得るために多数の巻線が必要であり、また原理的に直流電流比の測定が行えない、といった問題を抱えている。

そこで、本研究では室温で高感度な磁気センサとして利用可能なダイヤモンド量子センサを電流比較器の検出器に用いることで、電流計測の高精度化と広帯域化を目指している。Fig. 1 はノイズフロアが $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下であるセンサヘッド[1]をエアギャップに実装し、53 Hz の交流電流を巻線に流して得られたノイズスペクトルである。一次と二次の巻線はそれぞれがコア中に発生させる磁束の位相が反転するように巻かれており、打ち消し合った後の残留する電流成分を磁束として計測した。得られたノイズスペクトル (Fig. 1) から、ダイヤモンド量子センサにより残留磁束を検出していることを確認した。

[1] 村松秀和ら: 第 71 回応用物理学会春季学術講演予稿集, 24p-1BB-3 (2024).

謝辞: 本研究の一部は、文部科学省 光・量子飛フラグシッププログラム(Q-LEAP) JPMXS0118067395、内閣府 SIP「先進的量子技術基盤の社会課題への応用促進」の支援を受けて行われました。

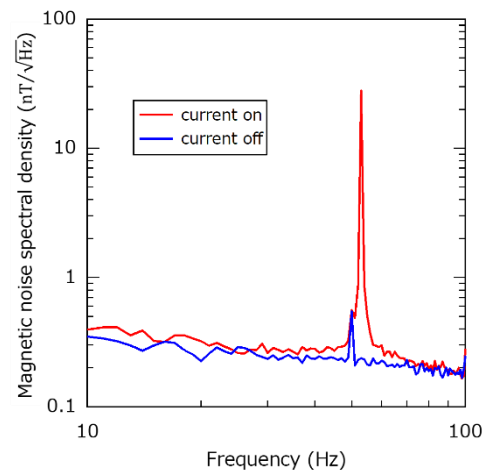


Fig. 1 The signal of residual magnetic flux generated by a 53 Hz current detected by the diamond quantum sensor.

Using the standard deviation for robust quantum sensing

Kyoto Univ.¹, UC Berkeley², LBNL³, QUP/KEK⁴, IPNS⁵, JAXA/ISAS⁶, Kavli IPMU/WPI⁷,
SOKENDAI⁸, Tohoku Univ.⁹, CERN¹⁰

○Ernst David Herbschleb¹, So Chigusa^{2,3}, Riku Kawase¹, Hiroyuki Kawashima¹,
Masashi Hazumi^{4,5,6,7,8}, Kazunori Nakayama^{9,4}, Norikazu Mizuochi^{1,10,4}

E-mail: herbschleb@dia.kuicr.kyoto-u.ac.jp

Various periodic signals can be detected with different techniques, for example low-frequency signals [1] or high-frequency signals [2]. However, when there are facets of randomness about the signal, e.g. a changing phase, such methods become less sensitive, as long measurements average the signal to zero. Here, we propose and analyse a robust technique to detect the amplitude of these signals.

In our method, instead of measuring the amplitude of a signal directly as in conventional methods, we measure the standard deviation, which is a different global property. Phase and frequency changes do not affect the result, and it is possible to account for amplitude distributions. For a high signal-to-noise ratio (SNR), this method has the same sensitivity as conventional techniques [1]. However, as opposed to our method, conventional techniques are not robust against the mentioned instabilities. For a low SNR, the behaviour is quite different, resulting in a worse sensitivity. These regimes are both analytically analysed, and numerically simulated for various parameters. Finally, we perform an example measurement with a single nitrogen-vacancy centre (see Figure 1).

We expect that our method is useful for the detection of light dark matter [3], and for mineral search under harsh conditions. For the dark photon and axion candidates, the dark matter field is effectively a periodic magnetic field with a limited coherence time when measured with nitrogen-vacancy centres [3]. Given the rather small signals to detect due to the small coupling to dark matter, long measurement times are a necessity, thus making the proposed method ideal for this kind of experiment.

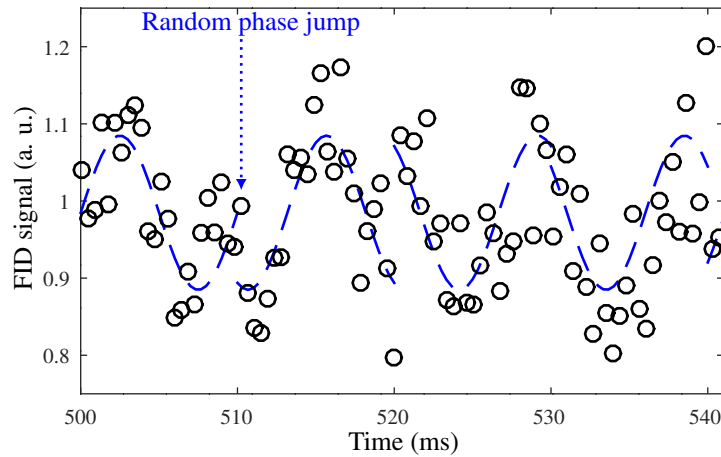


Figure 1: Measurement of an ac signal with random phase jumps (data with black circles). The blue dashed line is a guide-to-the-eye.

- [1] E. D. Herbschleb et al., Low-frequency quantum sensing, *Physical Review Applied* 18, 034058 (2022).
- [2] G. Wang et al., Sensing of arbitrary-frequency fields using a quantum mixer, *Physical Review X* 12, 021061 (2022).
- [3] S. Chigusa et al., Light dark matter search with nitrogen-vacancy centers in diamonds, *arXiv:2302.12756* (2023).

The research is supported by KAKENHI (No. 22K14560), MEXT Q-LEAP (No. JPMXS0118067395), CREST (No. JPMJCR23I5), and the Collaborative Research Program of ICR, Kyoto University (2021-114).

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターからの同一光子生成

Generation of Nearly Identical Photons from Lead-Vacancy Centers in Diamond

東工大¹, NIMS², QST³ ○阿部 椋太郎¹, 汪 鵬¹, 谷口 尚², 小野田 忍³, 波多野 睦子¹, 岩崎 孝之¹Tokyo tech¹, NIMS², QST³ ○R. Abe¹, P. Wang¹, T. Taniguchi², S. Onoda³, M. Hatano¹, T. Iwasaki¹,

E-mail: abe.r.ag@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中の鉛-空孔(PbV)センターはその優れた光学・スピン特性から量子ネットワーク中のノードとして期待されている[1, 2]。離れた2点間で量子もつれを形成するためには複数のPbVから放出される区別不可能な同一光子を用いた2光子干渉を観測する必要がある。しかし、発光波長および線幅が同一な光子を見つけるためには狭い不均一分布および光源の電荷安定性が不可欠である。本研究では、異なるアニール温度で形成したPbVの不均一分布および電荷安定性を調べ、複数のPbVから同一光子を観測することに成功した。

IIa(001)単結晶ダイヤモンド基板に鉛イオンを12 MeVで注入後、2100 °Cまたは2300 °Cの高温高压アニールを施すことで2種類のPbV試料を作製した。サンプルはクライオスタットで6 Kに冷却し、波長可変レーザーを用いて共鳴励起計測を行った。

PLE測定から両サンプルとも不均一分布は約15 GHzであったのに対し、電荷安定性において顕著な違いが見られた。Fig. 1は異なるアニール温度の2種類のサンプルにおいて、ターゲットであるPbVから約4 μm離れた位置に非共鳴である532 nmレーザーを5秒間照射した直後にPLEスペクトルを測定する工程を10回繰り返した際に発光が消失する確率を示している。2300 °Cアニール試料では、532 nmレーザーパワーを上昇させても、照射がないときと同様の消失確率(30%以下)であるのに対し、2100 °Cアニール試料では75 μWを超えると消失確率が高くなり、150 μW以上では発光が一度も観測されなかった。これは、2100 °Cアニール試料で残存していた欠陥から532 nmレーザー励起によって放出されたキャリアをPbVが捕獲することで暗状態に遷移している一方、2300 °Cアニール試料ではその欠陥の生成が抑制されているためであると考えられる。Fig. 2(a, b)は2300 °Cサンプルにおける共鳴励起による共焦点顕微鏡像および発光点のPLEスペクトルである。PLEスペクトルが重なり合っており、ほぼ同一な光子を複数のPbVから検出できていることがわかる。本結果は、PbVセンターを用いた2光子干渉の観測に繋がる成果である。

本研究はJSPS 科研費JP22H04962、文部科学省Q-LEAPフラッグシッププログラム(No. JPMXS0118067395)、JST ムーンショット型研究開発事業(JPMJMS2062)の助成により行われた。

[1] P. Wang et al., ACS Photonics 8, 2947 (2021).

[2] P. Wang et al., Phys. Rev. Lett. 132, 073601 (2024)

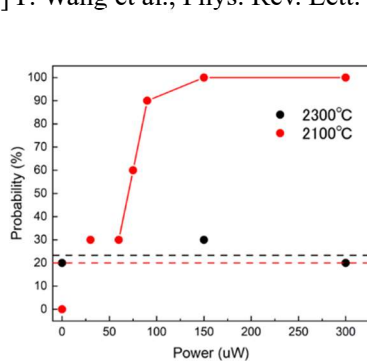


Fig.1 Vanishing probability of PLE spectrum

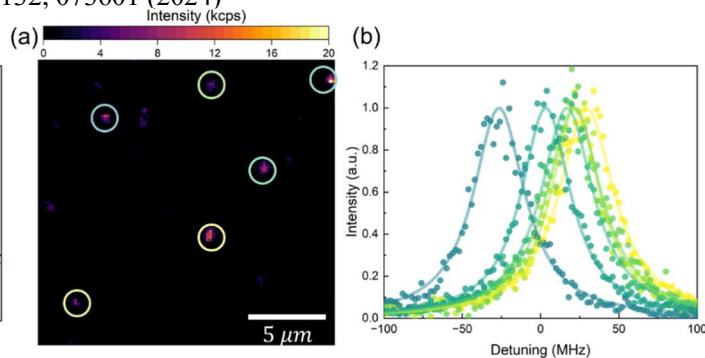


Fig.2 (a) Resonant confocal mapping (b) PLE spectra of multiple PbVs

爆轟ナノダイヤモンド中の SnV 中心の発光スペクトル測定

Photoluminescence Spectrum of SnV Center in Detonation Nanodiamond

京大化研¹, 量研機構², (株)ダイセル³, 京大スピンセンター⁴ (M1)大堀 真尚¹, 蘇 梓傑^{1,2},
藤原 正規¹, 牧野 有都³, 鶴井 明彦³, 西川 正浩³, 水落 憲和^{1,4}

ICR, Kyoto Univ.¹, QST², Daicel Corp.³, CSRN, Kyoto Univ.⁴ [○]M. Ohori¹, F. T. K. So^{1,2}, M. Fujiwara¹,
Y. Makino³, A. Tsurui³, M. Nishikawa³, and N. Mizuochi^{1,4}

E-mail: ohori.masanao.27s@st.kyoto-u.ac.jp

[背景] 色中心を含むナノダイヤモンド (ND) は、細胞等の生体試料に適用できる有力な蛍光プローブである。数ある色中心の中で、シリコン-空孔 (SiV) 中心に代表される IV 族色中心は、室温でも鋭いゼロフォノン線 (ZPL) を示し、IV 族原子に応じてピーク波長が異なるため、マルチカラーイメージング用の蛍光プローブとして利用できる。加えて、ピーク波長が温度で変化するため、光で検出可能な温度センサとしても注目される。このような色中心を含む ND を細胞内の様々な小器官に導入するには、小粒径かつ大量の ND が必要だが、爆轟法はこれらの条件を満たす優れた合成法である。これまで SiV 中心、ゲルマニウム-空孔 (GeV) 中心を含む爆轟ナノダイヤモンド (DND) の合成が報告され^[1]、DND を用いた温度感度計測も報告された^{[2][3]}。その際、スズ-空孔 (SnV) 中心を含む DND の合成も試みられたが、スズ原子は原子半径が大きく、取り込み効率の低さから実験的にはこの存在が確認されなかった。DND 中の SnV 中心を見つけることは、新規の DND 蛍光プローブの発見に加えて、爆轟法による色中心合成のメカニズムへの理解にも重要である。本研究では、72 時間熱混酸洗浄による表面不純物除去と、高い検出効率を持つ共焦点顕微鏡により、DND 中 SnV 中心からの発光スペクトルの測定に成功したので、これを報告する。

[実験・結果] ダイセル社合成の Sn ドープ DND(粒径 ~ 10 nm)^[1]を熱混酸で洗浄後 (HNO₃: H₂SO₄ = 1:3, 130°C, 72 時間)^[4]、1 mg/mL 懸濁液をスライドガラス上に 10 µg 滴下、乾燥塗布した。この試料の発光画像及び発光スペクトルを自作の共焦点顕微鏡で観察した。発光画像測定の際には SnV 中心の ZPL ピーク波長 620 nm を中心に ±10 nm のバンドパスフィルタを用いて SnV 中心からの発光を示す輝点を効率良く探索した。次に画像上の輝点に対して発光スペクトルを測定した。代表例を図 1 に示す。波長 600–850 nm に窒素-空孔(NV)中心由来のブロードなフォノンサイドバンドが存在し、その中に SnV 中心の ZPL である 620 nm のピークを確認した。発表では測定の詳細と DND 中 SnV 中心の発光に関する考察を紹介する。

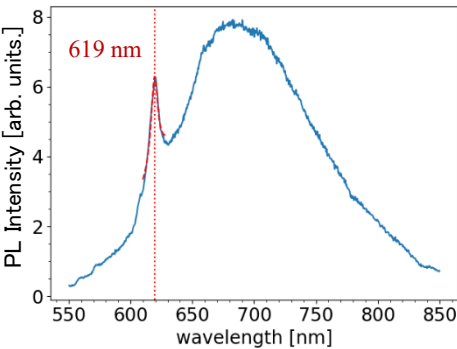


図 1 Sn ドープ DND の発光スペクトル

発表では測定の詳細と DND 中 SnV 中心の発光に関する考察を紹介する。

[謝辞] 本研究は MEXT Q-LEAP (No. JPMXS0120330644)の支援を頂いて行われました。ここに深く感謝致します。

[参考文献] [1] Makino, Y. *et al. Diam. Relat. Mater.* **130**, 109493 (2022) [2] Fujiwara, M. *et al. Carbon* **198**, 57-62 (2022). [3] Fujiwara, M. *et al. Appl. Phys. Lett.* **123**, 181903 (2023). [4] Terada, D. *et al. Nanoscale Adv.* **4**, 2268 (2022)

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターの非共鳴レーザによる電荷状態遷移

Charge state transition of lead-vacancy centers in diamond by non-resonant laser irradiation

東工大¹, NIMS², QST³, [○]陳溢暘¹, 阿部椋太郎¹, 谷口尚², 小野田忍³, 波多野睦子¹, 岩崎孝之¹

Tokyo Tech¹, NIMS², QST³, [○]Y. Chen¹, R. Abe¹, T. Taniguchi², S. Onoda³, M. Hatano¹, T. Iwasaki¹

E-mail: chen.y.be@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中の IV 族-空孔センターは安定した発光と鋭いゼロフォノン線を示すために量子情報通信応用での固体量子光源として期待されている。その中で鉛-空孔 (PbV) センターは最も大きな基底状態分裂を有するため、同じ測定温度条件でより長いスピンコヒーレンス時間が期待できる[1]。我々はこれまでに共鳴励起を用いて PbV センターの自然幅に近い発光の測定に成功しているが、共鳴励起時に暗状態へ遷移することで発光が消失する現象も観察している[2]。非共鳴の緑色レーザ照射で PbV の発光は回復するが[2]、電荷状態遷移は非共鳴レーザの波長に依存すると考えられる。実際、スズ-空孔センター (SnV) では、緑色よりも青色レーザが発光を効率的に回復させることがわかっている[3]。本研究では異なる波長の非共鳴レーザを PbV センターに照射することで、電荷遷移に大きな影響を与えることを見出した。

Ila 型の単結晶ダイヤモンド(001)に 12 MeV の加速電圧で Pb イオンを注入し、2100–2300°C/7.7 GPa の高温高压アニールを施すことで PbV センターを形成した。試料はクライオスタットで 5 K まで冷却した。波長可変レーザを用いることで負電荷 PbV センターの共鳴励起を行い、非共鳴励起には波長 532 nm (20 μ W) または 445 nm (10 μ W) のレーザを用いた。レーザの照射時間を制御するために 445 nm レーザはレーザ本体搭載の変調機能を用い、共鳴レーザと 532 レーザの変調には AOM を用いた。

Fig. 1 に 532 nm レーザ照射時の負電荷 PbV センターの発光強度の時間変化を示す。PbV センターを暗状態にした後に (後述するように 445 nm レーザ照射による消失を利用)、2 ms 間 532 nm レーザを照射してから共鳴励起で電荷状態を計測するパルスシーケンスを 15 回繰り返した。532 nm レーザを照射するほど共鳴励起による蛍光が増加しており、532 nm レーザは PbV を明状態に回復させている。Fig. 2 の緑プロットは横軸を非共鳴レーザ照射時間のみにしたものであり、フィッティングから発光回復レートとして 84 Hz が得られた。次に、非共鳴レーザを 445 nm にしたパルスシーケンスを照射し、結果を示したのが Fig. 2 の青プロットである。532 nm レーザとは対照的に、445 nm レーザを照射するほど負電荷 PbV からの発光が減少していることがわかる。消失レートは 293 Hz であり、532 nm レーザよりも弱いレーザパワーにも関わらず高いレートが得られた。本結果は、非共鳴レーザは PbV センターの発光を回復させるだけでなく、波長によっては直接暗状態に遷移させることを示している。青色レーザで回復が促進させる SnV センター[2]とは全く異なる挙動であり、PbV センターの電荷状態制御にとって重要な知見となるものである。

本研究は JSPS 科研費 JP22H04962、文部科学省 Q-LEAP フラッグシッププログラム (No. JPMXS0118067395)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2062) の助成を受けたものである。

[1] P. Wang et al., ACS Photonics 8, 10, 2947–2954 2021.[2] P. Wang et al., Phys. Rev. Lett. 132, 073601 2024 [3] J. Görlitz et al., npj Quantum Information, 8, 45, 2022.

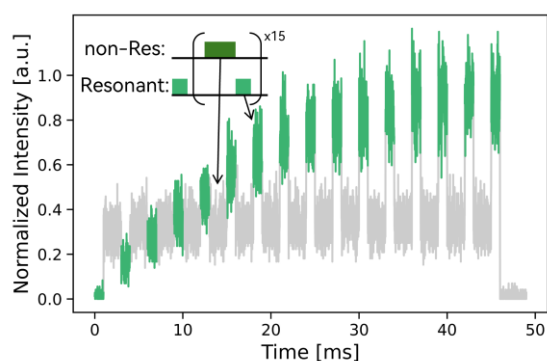


Fig. 1 Recovery of fluorescence of PbV upon 532 nm laser irradiation.

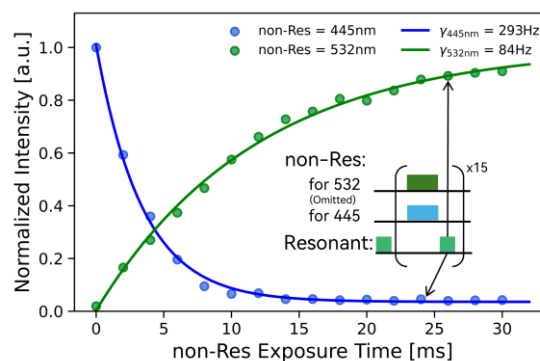


Fig. 2 Decay rates of recovery and termination of fluorescence of PbV.

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターにおける コヒーレントポピュレーショントラッピング

Coherent Population Trapping of a Lead-Vacancy Center in Diamond

東工大¹, NIMS² ○池田翔¹, 陳溢暘¹, 汪鵬¹, 阿部椋太郎¹, 谷口尚², 波多野睦子¹, 岩崎孝之¹

Tokyo Tech.¹, NIMS.², °K. Ikeda¹, Y. Chen¹, P. Wang¹, R. Abe¹, T. Taniguchi², M. Hatano¹,

T. Iwasaki

E-mail: ikeda.k.bp@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中の IV 族カラーセンターは、発光がゼロフォノン線に集中しており、外部ノイズに対して高い耐性を持つことから、量子ネットワークへの応用が期待されている。その中でも鉛-空孔(PbV)センターは、IV 族カラーセンターの中でも基底状態分裂幅が広く、他の IV 族カラーセンターと比べてより高い温度下でも長いスピンコヒーレンス時間が得られることが予測されている[1]。我々はこれまでに PbV センターの自然幅に近い発光[2]およびスピン緩和時間(T_1)の測定[3]を報告しているが、量子状態の保存のためにはスピンのコヒーレント状態生成が必要である。本研究では、コヒーレント状態の観測方法としてコヒーレントポピュレーショントラッピング(CPT)を行い、PbV で初めてスピンのコヒーレント状態の観測に成功した。

IIa (001) 単結晶ダイヤモンド基板に鉛イオンを注入し、2100°C、7.7 GPa のアニール処理を行った高品質な PbV センターサンプル[1]を使用した。このサンプルに表面に対して垂直に磁場を印加し、サンプルは 11.5 K に冷却した。共鳴レーザー (300 nW) を電気光学変調器 (EOM) に通して PbV に照射した。

Fig. 1 に示す 3 準位間での Λ スキームを用いることで CPT 測定を行った。共鳴レーザーをスピン保存遷移を励起するためのポンプ光とし、EOM でプローブ光の周波数を変化することでスピン反転遷移を同時に励起させた。Fig. 2 にプローブ光の detuning (Δ) に対する PbV センターの発光強度の変化を示す。ピークの中央付近に発光強度が減少する谷を観測した。これは、あるレーザー周波数で $\Delta = 0$ となることによって基底状態の 2 準位から同時に励起が起これ、コヒーレントな重ね合わせ状態にトラップされることで発光が失われる現象が観測できていることを示している。本成果は PbV センターにおいて初めてコヒーレント状態を観測したものであり、今後、スピンディフェージング時間およびスピンコヒーレンス時間の評価につながるものである。

本研究は JSPS 科研費 JP22H04962、文部科学省 Q-LEAP フラッグシッププログラム (No. JPMX0118067395) の助成を受けたものである。

[1] P. Wang, *et al.*, ACS Photonics 8, 2947, 2021. [2] P. Wang, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 132, 073601, 2024.

[3] 大羽一輝. 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会. 22p-A601-17. 2023.

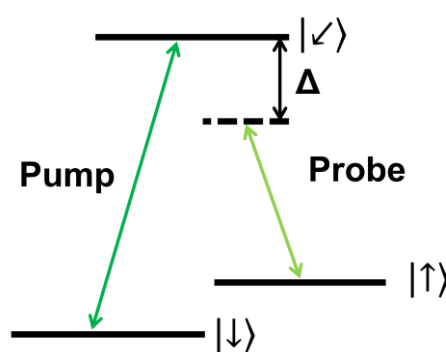


Fig. 1 Λ scheme for CPT.

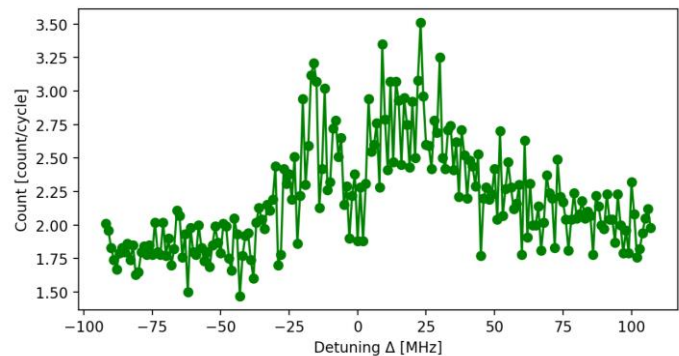


Fig. 2 CPT on a PbV center.

炭化ケイ素シリコン空孔荷電状態安定性の定量的解析

Quantitatively charge-state-stability analysis of silicon vacancies in SiC

QST¹, 電中研², Quemix³, 東大⁴, 東北大⁵ ○山崎 雄一¹, 明石 遼介¹, 花輪 雅史²,
村田 晃一², 佐藤 真一郎¹, 宮脇 信正¹, 圓谷 志郎¹, 増山 雄太¹, 西谷 侑将^{3,4},
松下 雄一郎^{1,3,4}, 土田 秀一², 好田 誠^{1,5}, 大島 武^{1,5}
QST¹, CRIEPI², Quemix Inc.³, Univ. of Tokyo⁴, Tohoku Univ.⁵, ○Y. Yamazaki¹, R. Akashi¹,
M. Hanawa², K. Murata², S.-I. Sato¹, N. Miyawaki¹, S. Entani¹, Y. Masuyama¹, Yusuke Nishiya^{3,4},
Y. Matsushita^{1,3,4}, H. Tsuchida², M. Kohda^{1,5}, T. Ohshima^{1,5}

E-mail: yamazaki.yuichi@qst.go.jp

【研究背景】

炭化ケイ素(SiC)中のシリコン空孔(V_{Si})を機能させるには荷電状態を負の1価(V_{Si}⁻)にする必要がある[1]。我々の研究目標である SiC-V_{Si} 量子センサによる SiC パワーデバイス内部直接観察に向けて、前回の発表[2]ではドーピング条件および V_{Si} 濃度を広範囲に変化させて体系的な V_{Si}⁻安定性調査結果について報告した。本研究では、得られた V_{Si}⁻安定性の定量的な解析を行なった。

【実験方法】

n⁺基板上に様々なドーピング条件(p および n 型、10¹⁵-10¹⁹cm⁻³)で作製した 4H-SiC エピタキシャル膜(5-6μm)および p/n⁺-sub 界面に形成される空乏層(i 層模擬)中に、粒子線描画法(PBW)(イオン種: He, エネルギー: 0.5 MeV(空乏層に対しては 2.5MeV)、照射量: 3×10³⁻⁶/φ1μm (=3×10¹¹⁻¹⁴cm⁻²))により V_{Si} ドット(5x5 μm²)パターンを形成した。V_{Si}⁻の光励起には波長 785nm のレーザーを用いた。

【実験結果】

図中のマーカーは規格化発光強度のドーピング条件および照射量依存性である。中～高濃度 p, n 層で観察される発光強度の急減はドーパント補償有無による V_{Si}⁻から V_{Si}⁰ or 2- or 3- への変化が原因と考えられる。しかし、n 層で観察された発光強度増加領域での一定発光強度や低濃度 p 層での発光強度急減(中濃度 p 層では発光確認)は補償効果では説明できない。光無照射下では V_{Si}⁻がほぼいない一方、V_C⁺は安定に存在[3]することから、我々は光照射下における V_C⁺から V_{Si}⁰への伝導帯を経由した電子移動がこれらの挙動を説明できる機構と考えている。この機構では、照射量が多いほど電子を捕獲する正味の V_C 量が減少していく(NV_{Si}/NV_C が大きくなる)。これを考慮した定量的解析を行ったところ、実験結果を概ね再現することができた。詳細は当日報告する。

【謝辞】 本研究は科研費(21H04553, 20H00355)、MEXT Q-LEAP(JPMXS0118067395)、安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の助成を受けたものである。

【参考文献】 [1] M. Widmann et al., Nat. Mater. **14** 164 (2015). [2] 山崎ら、第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 24a-1BB-10. [3] N. T. Son et al., J. Appl. Phys. **129** 215702 (2021).

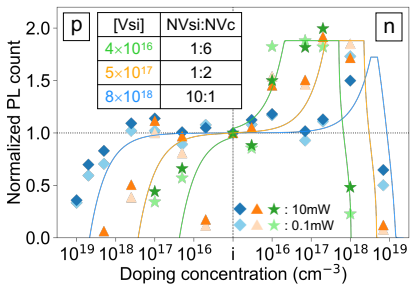


Fig.1 Comparison of experimentally obtained and theoretically calculated PL intensity (≡fraction of V_{Si}⁻) on doping conditions and fluence.

室温における 4H-SiC 中 V2 中心蛍光の偏光特性

Polarization properties of fluorescence from V2 centers in 4H-SiC at room temperature

京大化研¹, 京大スピンセンター², 量研³, 東北大⁴, QUP KEK⁵ ○西川 哲理¹, 森岡 直也^{1,2},

阿部 浩之³, 大島 武^{3,4}, 水落 憲和^{1,2,5}

ICR Kyoto Univ.¹, CSRN², QST³, Tohoku Univ.⁴, QUP KEK⁵ ○Tetsuri Nishikawa¹, Naoya Morioka^{1,2},

Hiroshi Abe³, Takeshi Ohshima^{3,4}, and Norikazu Mizuoichi^{1,2,5}

E-mail: nishikawa@dia.kuicr.kyoto-u.ac.jp

4H 型の炭化ケイ素(4H-SiC)中のシリコン空孔(V_{Si})は非等価な格子位置により二種類存在し、六方晶位置($V_{Si}(h)$):V1 中心)と立方晶位置($V_{Si}(k)$):V2 中心)で異なる発光・スピン特性を有する[1]。このうち V2 中心は室温で観測可能なスピンを有し、量子センサ等への応用が期待されている。 V_{Si} は 4A_2 、 4E の二つの電子励起配置を有し、これらの混合状態が励起状態(ES)となるが、第一及び第二励起状態(ES1, ES2)はそれぞれ 4A_2 および 4E を主成分とする[3]。V1 中心では低温下で二つのゼロフォノン線(ZPL)発光 V1(E||c)および V1'(E⊥c)が知られ、2 つの遷移は波長と偏光特性で区別できる(図 1)[1]。低温では ES1 に起因する E||c 蛍光の強度が強いが、70 K 以上では熱励起によって ES2 の占有が増加し、E⊥c 蛍光が増強する[2]。しかし、V2 中心の発光スペクトルには E||c の ZPL(V2)のみが存在し、E⊥c ZPL(V2')の観測は報告されていない。V2 中心における ES2 の存在は共鳴光学遷移幅の温度依存性と DFT 計算によって示唆されたが[3]、推定された ES1,2 間のエネルギー差が 22 meV と大きい[3]。したがって ZPL を弁別可能な低温領域では ES2 の占有が顕著でなく、V2 中心における ES2 がもたらす発光特性への影響は未だ詳細が明らかでない。V2 中心は発光強度の低さに課題があり、量子応用に向けて光学特性の詳細を明らかにすることは非常に重要である。本研究では、V2 中心における 2 つの ES が光学特性に与える影響を調べるため、室温における V2 中心の蛍光強度の偏光特性を、単一欠陥を用いて(0001)面及び(11̄00)面から評価した。

4H-SiC (0001) 4°オフエピ成長試料に電子線照射によって単一 V2 中心を作製し、へき開によって(11̄00)面を露出した。波長 730 nm のレーザーを励起光源とした共焦点顕微鏡装置を用いて V2 中心発光の偏光特性を検出角を変えながら評価した。図 2 に示すように(0001)面測定では蛍光強度が E⊥c 方向において等方的であるが、(11̄00)面測定では E||c 成分で強い蛍光を観測し、トータルの飽和蛍光強度も(0001)面測定と比較して増加することが分かった。また、(11̄00)面測定におけるトータルの飽和強度は励起レーザーの偏光方向に影響されないと思われたが、実際には偏光方向に依存することが分かった。本発表では、この内容を含め、詳細な議論を行う。

本研究は MEXT QLEAP (JPMXS0118067395)、科研費 (JP22H01526, JP21K20502, JP23K19120)、京大ナノハブ拠点の支援を受けた。

[1] V. Ivády *et al.*, *Phys. Rev. B* **96**, 161114 (2017).

[2] R. Nagy *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **9**, 034022 (2018)

[3] P. Udvarhelyi *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **13**, 054017 (2020)

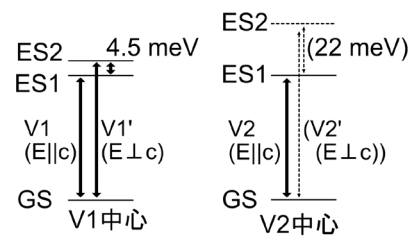


図 1 4H-SiC 中 V_{Si} のエネルギー準位図

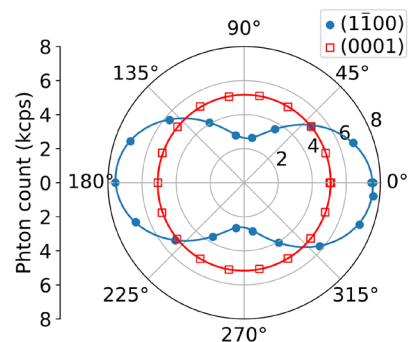


図 2 (11̄00)および(0001)面から観測した V2 中心蛍光の検出角依存性。
(11̄00)面: 0° = [0001], 90° = [11̄20]
(0001)面: 0° = [11̄20], 90° = [11̄00]